

弾性波によるトンネル切羽前方調査法の現地適用実験 (その2)

— T S P システムの現地適用例 —

Field Application of In-tunnel Horizontal Seismic Profiling System (Part2)

- An application of TSP System -

西野治彦\*・山本松生\*・大前晋一\*・稗田肇\*・中村康夫\*\*

Haruhiko NISHINO, Matsuo YAMAMOTO, Sin-ichi OMAE, Hajime HIEDA, Yasuo NAKAMURA

In-situ test for predicting ahead of the tunnel face was carried out using TSP ( Tunnel Seismic Prediction ) system ;the products of the Amberg Measuring Technique Ltd in Switzerland.

The TSP system has been succesfully utilized for predicting ahead of the tunnel face in Europe. We have been verifying the applicability of the system to the complicated geological situations in Japan. The predicted condition were very much in agreement with the rock mass actually exposed by the excavation. As a result, in-situ test has revealed that TSP system was very useful for Japanese tunnels.

Keywords: HSP, Seismic reflection method, Prediction ahead of the tunnel face,  
TSP System

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、掘削前に切羽前方の地質状況を予測することは、工事を安全かつ経済的に進めていくうえで重要な役割を果たす。現在、切羽前方の地質予測手法としては、切羽からの水平ボーリングを利用した調査などが一般的であるが、ボーリングにかなりの費用がかかるうえに施工の妨げになるなど問題点も多い。そこで、建設省土木研究所では、平成5年度より官民共同研究として、トンネルHSP共同研究会を発足させ、「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」を進めている。具体的には、弾性波を用いた新しい切羽前方予測技術の確立を目指して、予測システムの整備、現場適用実験、基準化作業等を行っている。このような中、トンネルHSP共同研究会では、その研究の一環として、既存の反射法地震探査システムであるスイスのアンベルグ・メジャーリング・テクニク社製のTSPシステムを用いて、施工中のトンネルを対象とした切羽前方予測実験を実施した。本報告では、TSPシステムの概要を示すとともに、TSPシステムによる切羽前方予測実験の内容と結果について報告する。

---

\* 正会員 佐藤工業(株) 技術本部土木技術部

\*\* 正会員 建設省土木研究所トンネルHSP共同研究会

## 2. TSPシステムの概要

### 2.1 基本原理

TSP (Tunnel Seismic Prediction) システムは、G. Sattel の提案および開発によるものであり<sup>1)</sup>、反射法地震探査を用いてトンネル坑内から切羽前方150 m程度の地質を探索・予知するものである。TSPシステムによる切羽前方予測の概念図を図-1に示す。TSPシステムの基本原理は、トンネルHSP法<sup>2)</sup>とほぼ同じであり、トンネル坑内において小発破を行い、反射波の状況からトンネル切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面(断層破砕帯、地層境界等)の位置、方向、地質変化の大きさ等を予測するものである。TSPシステムによる切羽前方予測の概略手順を図-2に示す。作業は、測定と解析からなり、トンネル坑内での測定により弾性波の受振波形データを得た後、そのデータを現場事務所のパソコンに転送して解析を行う。所要時間は、準備作業を除けば、測定、解析とも各々2時間程度である。

### 2.2 測定

TSPシステムの一般的な測定配置を図-3に示す。発振孔20~30孔と受振孔1孔を側壁に一直線上に配置し、各発振孔で順次発破を行うことにより、各発破毎の受振波形を受振点で測定する。トンネルHSP法では通常[1発振点×多受振点]の測点配置を基本とするのに対して、TSPシステムでは[多発振点×1受振点]の測点配置を採用していることが特徴となっている。ただし、発振点と受振点の組み合わせにより複数の受振波形データを得るという点では両者とも全く同じである。TSPシステムによる測定の具体的な測定手順を以下に示す。

#### ①準備作業:

- トンネル側壁に、発振孔20~30孔(深度1.5m,  $\phi$ 45mm)と受振孔1孔(深度2.4m,  $\phi$ 45mm)を削孔する。
- 受振孔に受振器用のケーシングを挿入し、モルタルで固着する。

#### ②測定作業:

- モルタル固着後、受振器用ケーシング内に挿入式受振器(加速度センサー、水平・垂直2成分)を挿入し、記録装置等との接続を行う。

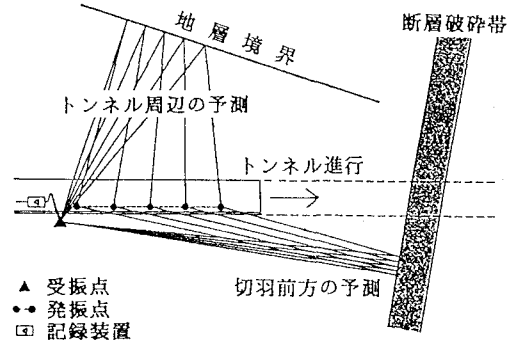
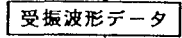
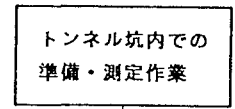


図-1 TSPシステムの測定概念図

### (1) 測定



### (2) 解析

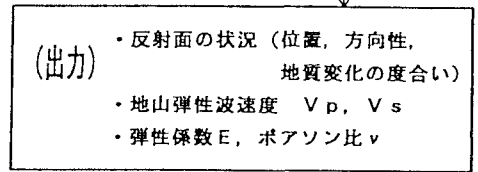
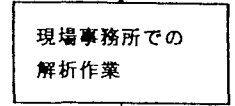


図-2 TSPシステムの実験手順

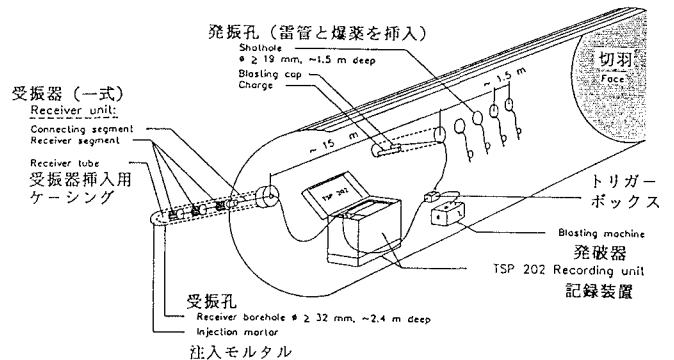


図-3 TSPシステムの測定配置図

- ・ 発振孔1孔に少量の火薬（雷管1個+ダイナマイト20～30g程度）を挿入し、発破を行い、受振器で受振波形を測定および収録する。
- ・ 同じ作業を全ての発振孔で順次繰り返し、各発破毎の受振波形を測定および収録する。

### 2.3 解析

TSPシステムでは、測定で得た受振波形データを解析し、切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面の状況を予測する。解析方法の概略を図-4に示すとともに、解析手順を以下に示す。

- ①解析に必要な受振波形データや測定点の位置等のデータをパソコンに転送および入力する。
- ②測定された弾性波の原波形記録から、直接波（P波、S波）、反射波、ノイズを波界分離する。
- ③直接波（P波、S波）の波形データから、最小2乗法を用いて地山弾性波速度 $V_p$ 、 $V_s$ を求める。
- ④地山弾性波速度 $V_p$ 、 $V_s$ から、動弾性係数および動ポアソン比を求める。
- ⑤波界分離後の反射波の波形データに対して、IPP法（Image-Point Processing）解析<sup>3)</sup>を行い、切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面の状況（位置、方向性、地質変化の大きさ）を求める。
- ⑥反射面の予測結果図を出力し、解析を終了する。

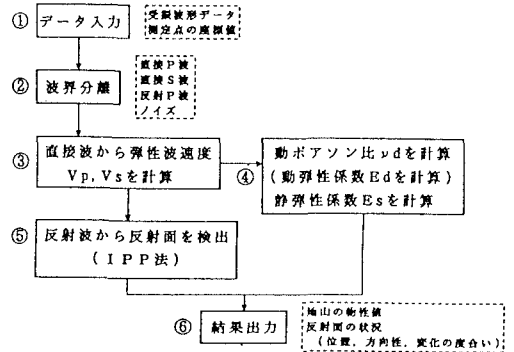


図-4 TSPシステムの解析フロー

### 3. 現場適用実験

施工中の実トンネルを対象にTSPシステムによる切羽前方予測の現場適用実験を行うとともに、その後の切羽観察により実際の地山状況の確認を行った。今回実施した現場適用実験の内容と結果を以下に示す。

#### 3.1 対象トンネルの概要

対象トンネルは、延長約3km、掘削径(D)約10mのトンネルであり、掘削工法はNATMベンチカット工法、掘削方式は発破工法を採用している。当トンネルの地質は、黑色頁岩、石英安山岩質凝灰岩からなり、石英安山岩が貫入する。実験を実施した箇所付近の地質は黑色頁岩主体で、部分的に破砕帯が認められる。

#### 3.2 実験概要

図-5に示すように、トンネル坑内の切羽付近において、発振孔32孔と受振孔1孔を右側壁に設け、TSPシステムによる反射法地震探査を実施した。実際に切羽付近から未掘削の切羽前方の地質を予測するとともに、実験後、掘削時の切羽観察により地山状況の確認を行なった。

#### 3.3 実験結果

TSPシステムによる切羽前方予測の現場適用実験結果を以下に示す。

##### (1) 直接波から求めた地山物性

発振孔-受振孔間において、直接波から求めた地山物性値を表-1に示す。

##### (2) 反射波による切羽前方予測

反射波による切羽前方予測結果と実際の地山状況との比較結果を図-6に示す。これらの比較結果や実験状況から得られた知見を以下に示す。

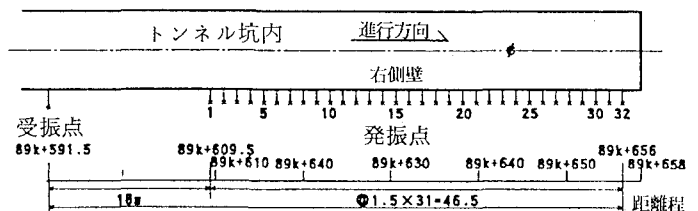


図-5 発振点・受振点の配置状況（平面図）

① T S P システムによる予測結果と実際の地山状況とは比較的よく対応しており、T S P システムが切羽前方予測において有効かつ実用的なシステムであることが確認できた。

② 一方、問題点としては以下の点が認められた。

- ・切羽後方の  $V_p$  を用いて反射面までの距離を算定するため、切羽後方と切羽前方の地質とが顕著に異なる場合には反射面までの距離に誤差が生じやすい。
- ・反射面の方向性については、予測結果と実際の走向、傾斜とが一致している場合も認められたが、異なる場合も認められた。

表-1 直接波から求めた地山物性値

地山弾性波速度 $V_p$	2.957 (km/s)
地山弾性波速度 $V_s$	1.483 (km/s)
動ポアソン比 $\nu_d$	0.33
動弾性係数 $E_d$	149,459 (kgf/cm <sup>2</sup> )

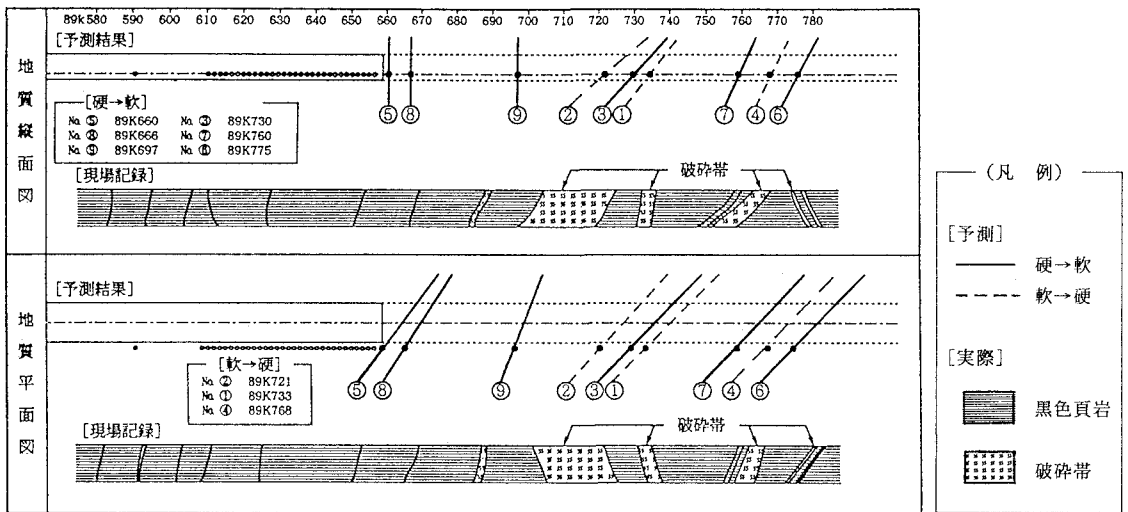


図-6 予測結果と実際の地質状況との比較

#### 4. まとめ

実トンネルを対象に T S P システムによる切羽前方予測の現場適用実験を実施し、同システムが、基本原理、精度および使用性の面で、かなり有効かつ実用的な切羽前方予測システムであることを確認した。今後、T S P システム以外にも既存の反射法地震探査システムに関する調査研究を広く行い、それぞれの長所や問題点を参考にしながら、より優れたトンネル切羽前方調査法や施工への反映方法を確立していく所存である。

#### 5. 参考文献

- (1) G.Sattel et al :Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First Break 10 , pp.19-25, 1992.
- (2) 稲崎富士, 千田敬二 : 坑内 H S P 法によるトンネル切羽前方弱層評価, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 271-275, 1993. 2
- (3) T S P 202 システムによる切羽前方予測実験・実験報告書 (トンネル H S P 研究会資料), 1994. 2